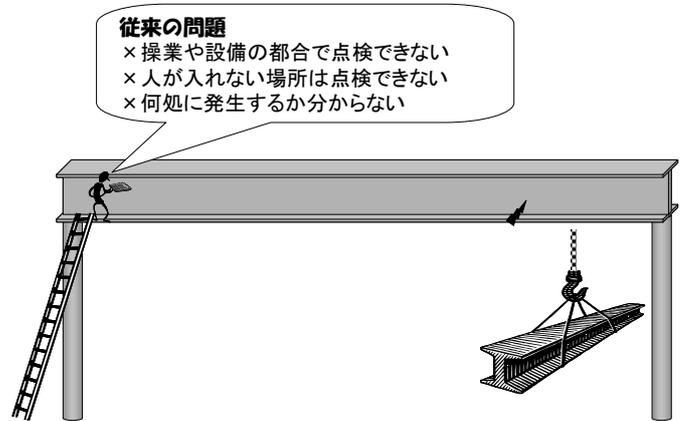


ガイド波を用いた鋼構造物のき裂診断手法

JFE シビル株式会社 榎原淳一

1 はじめに

鋼構造物において定期的な点検を行うことは、構造物の疲労破壊などに起因する事故を未然に防ぐためには重要なことである。現状では超音波探傷、磁粉探傷や目視点検が主な手法であるが、これらの手法は構造物に接近して試験を行う必要があり定期的な点検を行うことが難しい場合が多い。例えば、製鉄所などで用いられるクレーンランウェイガーダー(以降、CRG と記す)を点検する場合には、①クレーンの操業を停止する必要がある、②高所にあるため仮設足場などを設置する必要がある、



第 1 図 従来の問題

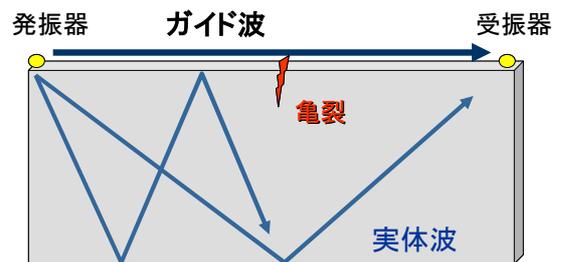
③他の設備との干渉や CRG の向きにより目視できない場合がある、④何処に欠陥が発生するか分からないので点検範囲が膨大となるといった問題がある(第 1 図)。高度経済成長時代に作られた製鉄所設備は建設後 40-50 年を超えるものが増えており早急な点検と更新が必要になっているが、上記理由により点検が思うように進んでおらず、操業に与える影響を最小限にとどめる診断手法が求められていた。

筆者は擬似ランダム波を用いた地盤調査技術を開発し、さらにこの手法を鋼構造物に応用するための研究を行ってきた¹⁾。新しく開発した手法はガイド波を用いることで、①クレーンの操業を止めず、②仮設足場を必要とせず、③診断は対象物に接近せず(地上で行う)、④その場で結果判定が可能、というものである。本文では新しい鋼構造物の非破壊診断手法の開発とその実験結果、および評価について述べる。

2 診断手法の概要

2.1 計測原理

ガイド波は「実体波である縦波と横波が境界条件を満たすように材料を伝播した結果、見かけ上得られる波」であり、伝搬現象が複雑であるため取扱いが難しい面もあるが、エネルギーの散逸が少なく遠方まで伝搬するという大きなメリットを有している²⁾。第 2 図に計測原理を示す。このガイド波を励起させるためにプレート側面(コバ面)に発振器と受信器を設置する。発振器からプレートの幅に応じた適切な周波数の波を発振するとプレート側面にガイド波が励起される。このガイド波が



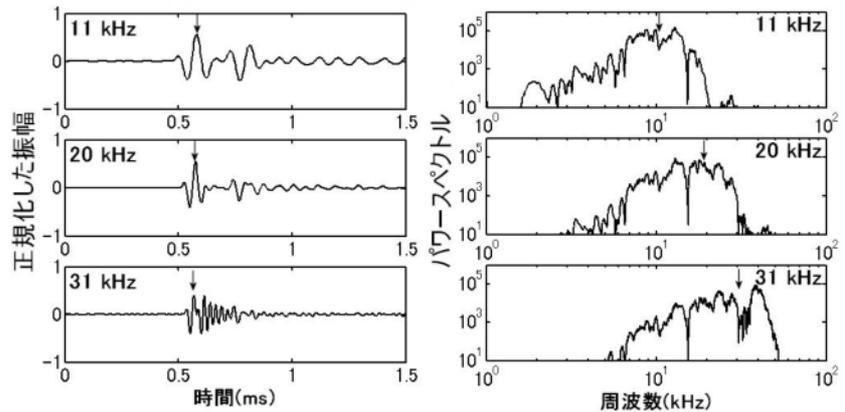
第 2 図 計測原理

プレート側面から発生した亀裂の影響を受けエネルギーが減衰すると、受信器に到達した波のエネルギーが減少することを利用し亀裂の有無を判定することができる。CRG を診断する場合にはフランジ側面(コバ面)に発振器と受信器を設置し、フランジ端部から発生した亀裂を調べることになる。なお、現段階ではウェブに発生した亀裂や、ウェブから発生した亀裂がフランジの内部に留まりプレート端部まで達していない場合には本手法を適用することはできない。

2.2 擬似ランダム波

ガイド波を発生させてその受信エネルギーを評価するためには、発振波の周波数と出力を正確に制御する必要がある。従来の音波を用いる技術では、打撃や鋼球の衝突によるパルス波、超音波振動子を用いたパルス波を用いることが一般的であるが、パルス波のパワースペクトルはホワイトノイズに近く周波数を制御することができない。また、打撃や鋼球の衝突、超音波振動子を用いた場合は発振エネルギーを一定にすることは難しい。これらの問題を解決するために本手法ではパルス圧縮³⁾と呼ばれる信号増幅方法の一つである疑似ランダム波を用いた。疑似ランダム波とは一定の長さを持つ連続した正弦波に疑似ランダム的な配列で位相変換を加えた波である。連続波を用いることにより送信するエネルギーを時間軸上に分散させているため、パルス波

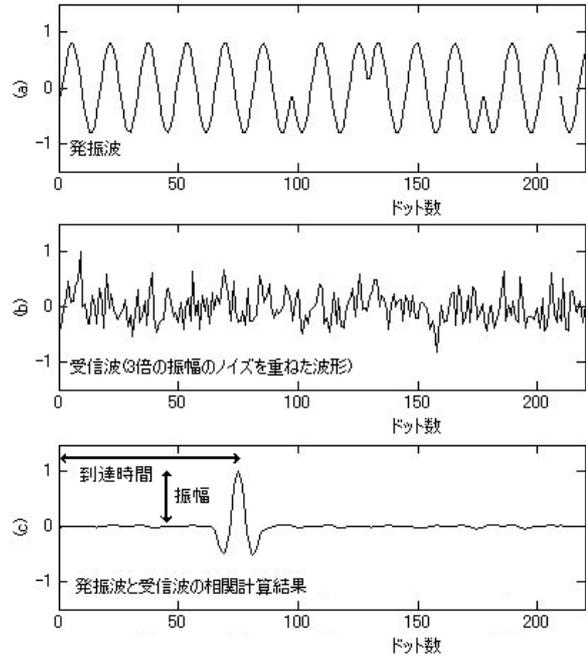
に比べて送信信号全体のエネルギーを大きくすることができる⁴⁾とともに周波数を正確に制御することができる。また、圧電セラミックス振動子と組み合わせて用いることで発振エネルギーを正確に制御することもできる。さらに疑似ランダム波はノイズの影響を受けにくいという性質を持つため騒音の多い現場では有効である。



第4図 相関関数の結果の波形(左)とその受信波のパワースペクトル

第3図に疑似ランダム波の例として、発振波(a)、受信波(b)、発振波と受信波の相関計算後の波形(c)を示した。発振波(a)に元の大きさの3倍のホワイトノイズを付加したものが受信波(b)であるが、ホワイトノイズが大きいため受信波からはもとの発振波形を判別できなくなっている。なお、受信波(b)には発振波(a)に対して75ドットの時間遅延を行ってある。相関関数の計算結果(c)には75ドットに相当する位置に相関関数の最大値が現れているが、これは受信波に加えた75ドットの遅延時間を示しており到達時間と考えてよい。また、この時の波形の振幅(ピークの高さ)は到達波の持つ受信エネルギーに比例する。故に、発振波と受信波の相関関数を計算することで媒体を伝播した波の到達時間とエネルギー量を得ることができる。前述した“疑似ランダム波はノイズの影響を受けにくい”という特長は現場では「クレーンが稼働していても影響をほとんど受けずに計測が可能である」という絶大な長所となる。

疑似ランダム波のもう一つの特長は、相関関数の結果として得られる波の周波数が発振波の中心周波数と一致するパルス波となることである。第4図は発振波の周波数を11kHz、20kHz、39kHzとして計測した際の相関関数計算後の波形と受信波のパワースペクトルを示しているが、発振周波数に対応した波長とパワースペクトルを得られていることが分る。相関関数の波形図の↓で示す波の高さが受信エネルギーに相当する。



第3図 疑似ランダム波の例(数値計算結果)

3 基礎実験とその結果

3.1 実験概要

計測装置は圧電セラミックス製の発振器と受信器、信号作成器兼データロガー、発振信号および受信信号増幅器で構成されている。実験は2段階に分けて行った。まず、亀裂に対する感度とガセットプレートなどの影響を把握する目的で、長さ2m、幅と厚みが400mm、10mmの鉄板に、長さ10mmから100mmの模擬亀裂(亀裂幅は5mm)を作成して亀裂長感度試験を実施した(第5図)。また、同じ寸法の鉄板に付属物を想定した長さ50mmから200mmのプレートを設置して付属物の影響試験を実施した(第6図)。

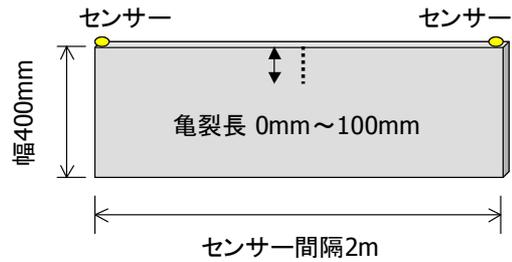
次に操業の影響を把握するために稼働している工場内にある4スパンのCRGを用いた現場実証実験を実施した。CRGの長さは約20mであった。これらのCRGは別途実施した磁粉探傷により亀裂の有無と長さが予め分っていた。

3.2 実験結果

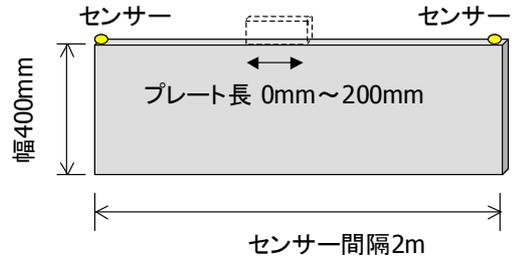
最初に亀裂長感度試験の結果を第7図に示す。上から亀裂長0mm、10mm、15mm、50mm、100mmの受信波形を示している。図中、理論計算から求めたガイド波の到達時間を矢印で示してある。横軸は時間(ms)、発振周波数は30kHzであった。同図から亀裂長が15mmを越えると受信

波の振幅が小さくなっていることが判る。次に、付属物の影響試験結果を第8図に示す。上からプレート長0mm、50mm、100mm、200mmの受信波形を示している。図内の矢印、横軸、発振周波数は亀裂長感度試験と同じである。同図からプレートの有無はガイド波の伝播にはあまり影響を与えていないことが判る。

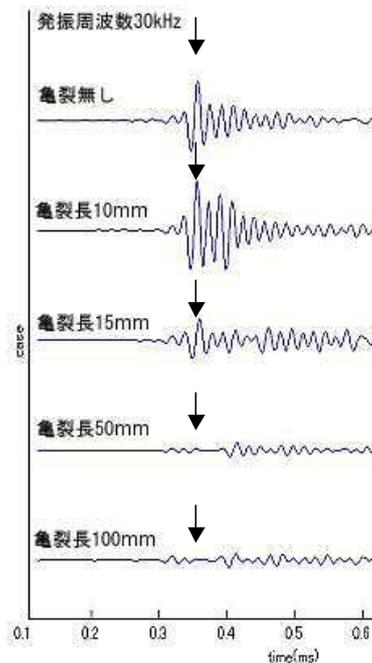
最後に現場実証実験の結果として“亀裂なし”、“亀裂長35mm”、“亀裂長70mm”、“亀裂なし”の計4ケースの結果を第9図に示す。これらの亀裂は何れも閉口状態であった。図



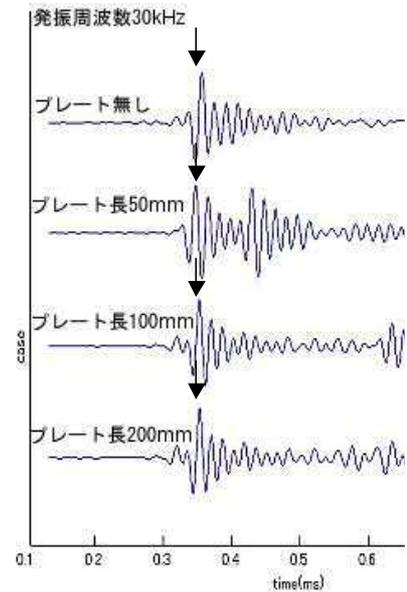
第5図 亀裂長に対する感度試験



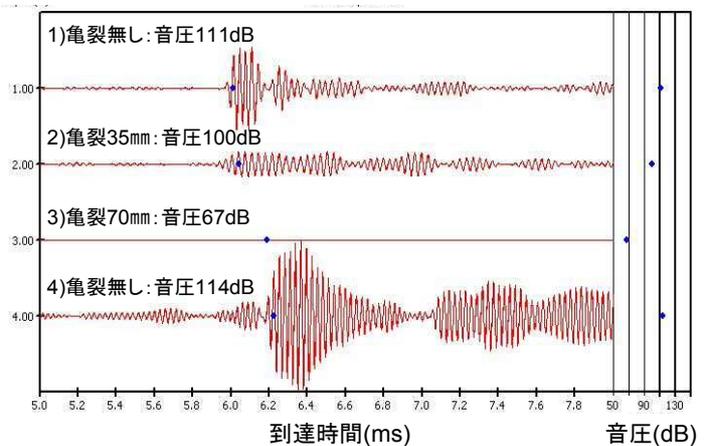
第6図 付属物の影響試験



第7図 亀裂長感度試験結果



第8図 付属物の影響試験結果

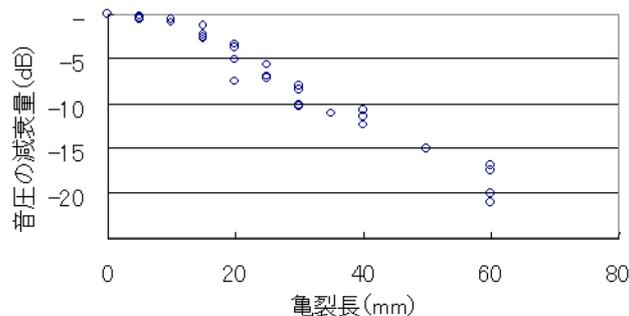


第9図 現場実証実験結果

中の青●印が到達波を示しており、このときの振幅は上から順に 111dB、100dB、67dB、114dB であった。dB は音圧単位であり 12dB はエネルギー量にして 4 倍に相当する。亀裂長が 35mm の場合には 100dB と亀裂のない場合の 4 分の 1 となっており、亀裂長が 70mm の場合にはエネルギー量は 100 分の 1 になっている。この結果からクレーン走行によるノイズの影響を受けることなく亀裂長に応じた結果を得ていることが分った。

3.3 亀裂長と音圧の関係

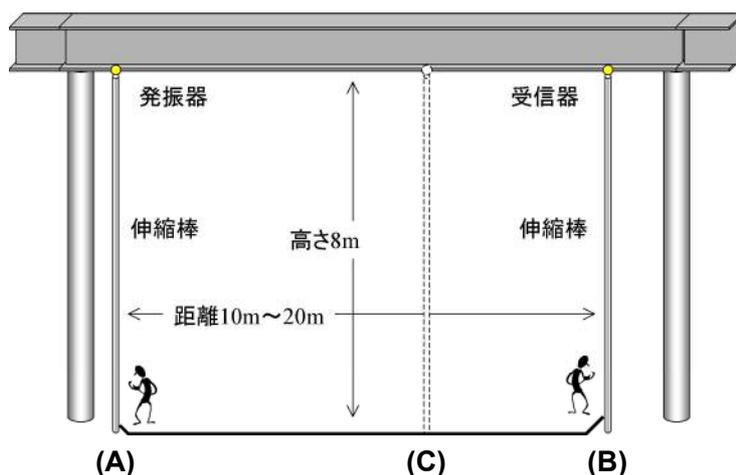
亀裂長と音圧の関係を調べるために第 5 図に示した実験の結果を縦軸に音圧の減衰量、横軸に亀裂長をとって比較した。これを第 10 図に示す。同図から音圧の減衰量と亀裂長には良い相関が認められること、亀裂長 15mm までは減衰量の変化は小さいが亀裂長が 15mm を越えると音圧の減衰量の変化が大きくなり、40mm で 12dB まで減少し、60mm を越えると 20dB になっていることが分かる。この結果から、亀裂長が 15mm 異常の場合にはより明瞭な結果を得られること、また、欠陥のない場合の音圧、つまり初期値が分っている場合には、音圧の減衰量から亀裂長を推定できることがわかった。



第 10 図 亀裂長と音圧の減衰量

4 試作器の製作と診断結果

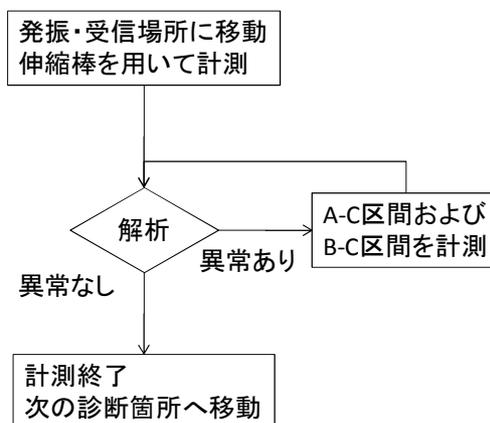
開発した診断手法を現場に投入するために試作器を製作した。試作器はフロアレベルから高さ 8m の位置にある CRG のフランジを診断することを目的とし(第 11 図)、第 12 図に示すようにフロアレベルから診断対象位置までセンサー部を突き上げる伸縮棒、発振器と受信器(センサー部)、データロガーと増幅器(本体)により構成されている。この発振器と受信器は特殊な加工がしてあ



第 11 図 フロアレベルからの診断



第 12 図 試作器(右は棒を縮めた状態のセンサー部)



第 13 図 作業フロー図

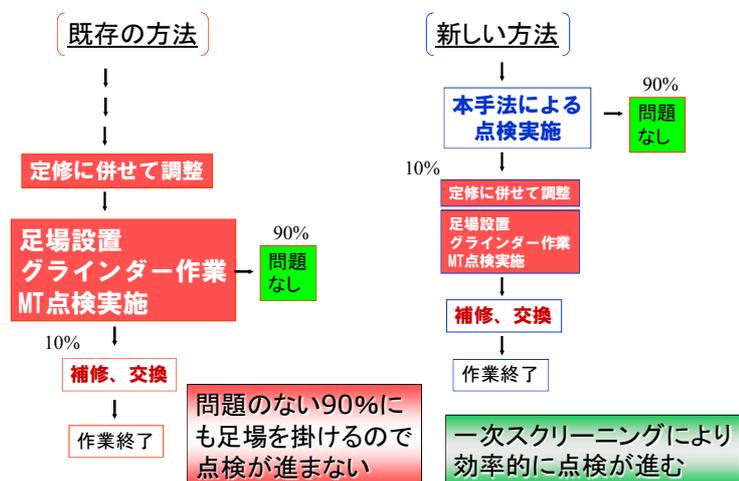
り、発振器と受信器を設置させる部位が塗装されていたり、錆や埃が付いていても問題なく計測を行うことができる。電源には車用のバッテリーを用いた。また、結果をその場で判定するための解析支援ソフトウェアも合わせて開発した。第13図に作業フローを示す。まず、CRGの両端(第11図の(A)-(B))にセンサーを設置し計測を行い、異常がなければ次のCRGに移動する。異常があれば(A)-(C)および(B)-(C)区間を計測し、さらに異常があれば計測区間を再分割することで亀裂の位置を特定することができる。本試作器を用いて既に200台以上の診断を行っているが、設備を止める必要がないため工場側に操業停止による損失を与えないこと、操業の制約を受けないために従来の約10分の1の期間で点検作業を行えること、清掃研磨や足場設置費用が不要となるため作業時間とコストの削減につながるなど現場に大きく貢献している。

5 まとめ

ガイド波を用いた鋼構造物のき裂診断手法を開発した。試験体を用いた基礎実験においては亀裂の有無や長さに対応した結果を得ることができた。また、試作器を用いた実現場での診断においてはその特長を發揮し現場のコスト、工期削減、点検作業の効率化に貢献することができた。

最後に本手法を用いる場合のメリットについて考察する。第14図に示すように、既存の手法では定期修理など工場設備の停止期間を利用し、足場設置、清掃研磨、点検を行う。例えばそのうちの10%に異常が発見されたとすると、残りの90%は足場を設置する必要がなかったということになる。工場操業の都合に合わせて点検をしている上に作業効率が良くないため、結果として全体の点検が遅々として進まないことになる。一方、本手法を用いる場合には、工場操業の都合に制約を受けず、また、足場を設置するなどの作業を行う前に“問題のない90%”を特定できる。従い、本手法を一次スクリーニングとして使用することで、異常箇所を短期間で特定し、その部分についてのみ対策を講じることができるため、全体として大変に効率の良い点検を行うことができる。

本手法は既に現場に投入され効果を発揮しつつあるが、現場のユーザーからは、①高さ8m以上の場合、②CRGのすぐ下に設備があり真上にセンサーを突き出せない場合、③製鉄所の転炉の真上で人が近づくことができない場合などでも使用できるように改良を求められている。現在、これらの課題への対応を進めているところである。また、鋼構造物だけではなくコンクリート構造物への適用についても開発を進めており、構造物の新しい診断技術として使っていくよう鋭意努力を続ける所存である。



第14図 本手法を用いるメリット

参考文献

- 1) 榊原淳一 他、音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術、JFE 技報、No.11(2006)、pp.50-pp.55
- 2) 西野秀郎、非破壊計測のためのガイド波の基礎と展望、非破壊検査 第52巻12号(2003)、pp.654-pp.661
- 3) Skolnik, M. : *Radar/ Handbooks 2nd Edition*, McGraw-Hill Inc., Chapter 10, 1970
- 4) 問山清和、林高弘、神谷庄司、改良型パルス圧縮方法によるガイド信号の高分解能化、超音波テクノ、No.9-10、pp.12-16、2006